

带空隙透榫节点弯矩-转角关系理论分析*

张锡成[†], 代武强, 薛建阳

(西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要:为研究带空隙的典型不对称榫卯节点——透榫节点的弯矩-转角关系, 构建了节点的埋置嵌压作用力学模型. 通过建立平衡方程、物理方程及几何关系, 推导了节点的弯矩-转角理论计算公式, 并与试验结果进行了对比, 分析表明: 理论计算结果与试验结果吻合较好. 进一步定量分析了空隙 g 以及摩擦因数 μ 对节点弯矩和初始转动刚度的影响, 结果表明: 随着空隙 g 的增大, 透榫节点正反向初始转动刚度均逐渐减小, 且与空隙 g 基本呈线性变化; 正反向加载情况下, 透榫节点弯矩和转动刚度均随摩擦因数的增大而逐渐增大, 尤其在节点屈服后表现更加突出; 节点间空隙是节点弯矩和转动刚度的主要影响因素, 摩擦因数对节点弯矩和转动刚度的影响略小于空隙的影响. 所得结果可为古建筑木结构的加固保护提供理论依据.

关键词:古建筑木结构; 透榫节点; 弯矩-转角关系; 转动刚度; 摩擦因数

中图分类号: TU366.2

文献标志码: A

Theoretical Analysis on Moment-rotation Relationship of Through-tenon Joint with Gap

ZHANG Xicheng[†], DAI Wuqiang, XUE Jianyang

(School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: To analyze the moment-rotation relationship of the representative asymmetric mortise-tenon joint to through-tenon joint with gap, an embedment model of joint was constructed. The moment-rotation calculation formula of through-tenon joint was deduced by establishing the relationships of forces, materials and geometries. Existing tests approved that the theoretical calculation results agreed well with the test results. Furthermore, the effects of the gap g and the friction coefficients μ on bending moment and initial rotation stiffness of the joint were analyzed quantitatively, and the results showed that: the positive and negative initial rotation stiffness of the through-tenon joint decreased with the increasing gap g , and there is a linear change between them. The bending moment and rotational stiffness of the joint increased as the friction coefficient increased under the positive and negative loading, and they have a significant change.

* 收稿日期: 2017-04-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51508454), National Natural Science Foundation of China(51508454); 陕西省自然科学基金资助项目(2016JQ5060), Scientific Research Project of Shaanxi Province(2016JQ5060); 陕西省教育厅科研计划项目(15JK1444), Scientific Research Plan Project of Shaanxi Education Department(15JK1444); 西安建筑科技大学青年科技基金资助项目(QN1612), Science Foundation for Young Scientist of Xi'an University of Architecture and Technology(QN1612); 西安建筑科技大学人才科技基金资助项目(RC1404), Science Foundation for Talents of Xi'an University of Architecture and Technology(RC1404)

作者简介: 张锡成(1984—), 男, 山东菏泽人, 西安建筑科技大学讲师, 博士

[†] 通讯联系人, E-mail: xicheng-zhang@163.com

especially when the joint yields. Gap in joint is a main influence factor on the bending moment and rotational stiffness of the joint, and the influence of friction coefficient on the bending moment and rotational stiffness of the joint is slightly less than that of the gap. The study in this paper provides theoretical basis for the mechanics analysis of ancient timber framed buildings.

Key words: ancient timber-framed buildings; through-tenon joint; moment-rotation relationship; initial rotation stiffness; friction coefficient

榫卯连接是中国古建筑木结构柱与枋等受力构件间的主要连接方式,这种连接方式使节点刚柔相济,具有一定的抗转动能力及良好的耗能性能^[1].古建筑中榫卯节点类型众多,根据外观尺寸及构造方式,可以分为不对称节点和对称节点,其中,不对称节点主要有透榫、半榫及十字箍头榫,对称节点主要有燕尾榫、馒头榫及单向直榫^[2].榫卯节点是一种典型的半刚性连接,对古建筑整体结构抗震性能具有重要的影响,它的破坏将会造成整体结构的倾斜甚至倒塌^[3].因此,对榫卯节点的力学性能进行研究具有重要的工程及理论意义.

近年来,国内学者陆续通过试验及理论分析对榫卯节点的力学性能展开了深入研究.谢启芳等^[2]通过低周反复加载试验对单向直榫榫卯节点的破坏特征、弯矩转角滞回曲线、骨架曲线、刚度退化规律和耗能性能进行了研究.隋葵等^[4]通过对典型透榫和燕尾榫榫卯连接的模型进行了低周反复荷载试验,研究了榫卯的半刚性连接特性和刚度退化规律.周乾等^[5]采用数值模拟方法,以抬梁式木结构的两种典型榫卯节点形式——直榫和燕尾榫为例,研究了弯矩作用下榫卯节点的破坏形式及破坏特征.陈春超等^[6]对不对称榫卯节点的正反向受弯性能进行了单调加载试验,获得了其弯矩-转角、拔榫量-转角关系曲线及破坏形态.此外,陈春超等在文献^[7]中又结合试验研究和数值模拟,在一定假定的基础上建立了瓜柱柱脚直榫节点的受弯力学模型.夏海伦^[8]通过对6个透榫节点试件的拟静力试验,得到了完好节点与残损节点的破坏形态、弯矩-转角滞回曲线、弯矩-转角骨架曲线、刚度退化规律、延性、变形能力及耗能等性能.潘毅等^[9]以直榫节点为研究对象,对其在低周往复荷载作用下的受力机理进行了详细分析,建立了考虑节点拔榫量影响的弯矩-转角力学模型和相应的实现算法,并给出了简化计算公式.谢启芳等^[10]基于燕尾榫节点受力机理的分析,对燕尾榫节点的转动弯矩进行了理论分析,推导了燕尾榫节点弯矩-转角理论计算公式,并与试验结

果进行了对比分析,理论分析与试验结果吻合较好.

从已有的榫卯节点力学性能研究成果发现,目前对节点的研究多为试验研究和数值分析,理论研究成果较少,且对带空隙透榫节点的研究也较少.本文在前人研究成果的基础上,采用线性强化弹塑性本构模型作为木材的应力-应变关系,并考虑榫卯节点转动中心随转动角度的改变,分析带空隙透榫节点的受力机理,建立了带空隙透榫节点弯矩-转角关系理论计算公式.

1 带空隙透榫节点模型及埋置嵌压作用机理分析

图1为透榫榫卯节点模型示意图.透榫节点由榫头和卯口组成,主要承受弯矩和剪力作用.节点在转动时,榫头和卯口之间会由于局部嵌压而发生塑性变形.图2为带空隙透榫节点埋置嵌压作用力学模型,图中 F 表示外荷载, P_1 、 P_2 、 P_3 分别表示榫头嵌压区挤压力的合力, f_1 、 f_2 、 f_3 分别表示榫头嵌压区摩擦力的合力.

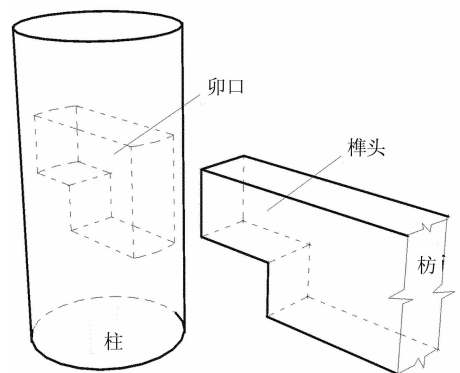
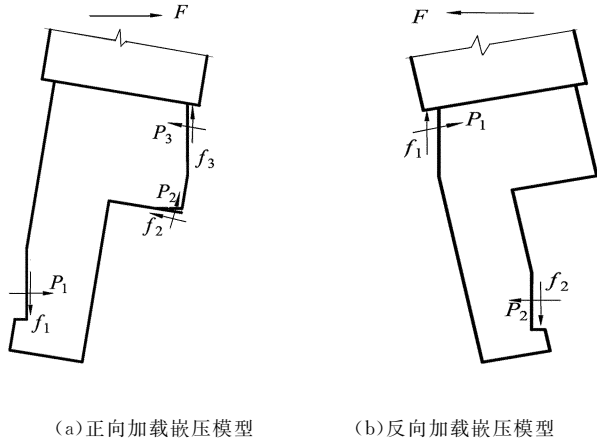


图1 透榫节点模型示意图

Fig. 1 Sketch of the through-tenon joint

榫头与卯孔之间由于木材干缩而产生空隙,导致带空隙透榫节点发生转动时产生一定的自由转

角,当节点转动角度大于自由转角时,榫头和卯口开始接触并发生挤压变形.由于木材顺纹方向的刚度远大于横纹方向,因此榫头仅在横纹方向产生埋置嵌压作用.此外,随着枋的转动,在榫卯挤压接触面上出现摩擦力,如图 2 所示.埋置嵌压作用引起的挤压力和摩擦力将绕榫头转动中心产生弯矩.



(a)正向加载嵌压模型 (b)反向加载嵌压模型

图 2 榫头埋置嵌压作用力学机理

Fig. 2 Mechanical mechanism of embedment effect

2 带空隙透榫节点弯矩-转角关系理论推导

2.1 计算假定

1)节点转动时,卯口为顺纹受压,榫头横纹受压,考虑到木材顺纹弹性模量 $E_{//}$ 远大于横纹弹性模量 E_{\perp} ,假定木材顺纹方向为完全刚性,埋置嵌压作用仅发生在横纹方向.

2)忽略卯口内榫头的弯曲、剪切变形,即认为榫头在卯口内仅发生刚体运动,从而榫头各点位移和挤压变形可由节点转角 θ 和几何关系确定.

3)由于嵌压作用,节点将会绕榫头变截面处的邻近区域内某一点发生转动,且大小榫头弯曲变形不一致,为了计算方便,取榫头形心为节点的转动中心,其坐标随枋的转动发生变化.

4)木材间摩擦因数通常受含水率与接触面粗糙程度等因素的影响而发生变化,为简化计算,取木材间摩擦因数为定值.

5)文献[11]通过试验得到了松木横纹局部嵌压的力-位移关系曲线,可看出松木的横纹受压曲线近似为两折线,塑性段直线斜率小于弹性段,刚度降低,但强度却呈线性增加.因此将木材的横纹受压本构关系简化为线性强化弹塑性模型^[11-12],如图 3 所示.

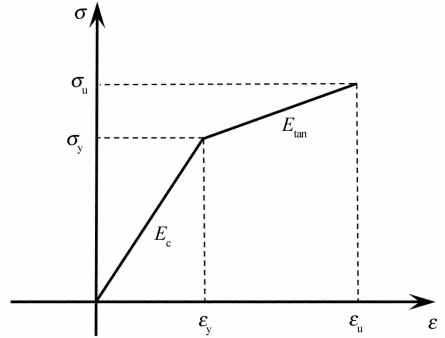


图 3 木材横纹径向本构关系曲线

Fig. 3 Stress-strain relationship of perpendicular to the grain of wood at radial direction

2.2 正向加载时带空隙透榫节点弯矩-转角关系理论分析

为了便于绘图标注及与现有试验作对比,文中所建立的透榫节点模型均采用柱水平放置,枋竖直放置时的节点立面图.图 4 所示为未发生转动时带空隙透榫节点榫心位置图, c 与 c_1 分别表示大榫头与小榫头榫高, c_2 表示变截面处的榫头高度, g 表示空隙, $c-g$ 与 c_1-g 分别表示大榫头与小榫头削减后的截面高, h_1 与 h_2 分别表示大榫头与小榫头的榫长, h_3 表示小榫头形心至柱下表皮的距离.考虑到榫头宽度将在下文出现,此处记榫头宽度为 b .以小榫头形心作为坐标原点 $O(0,0)$ 建立直角坐标系,可求得榫头形心 $O_1(x_0, y_0)$ 的坐标值:

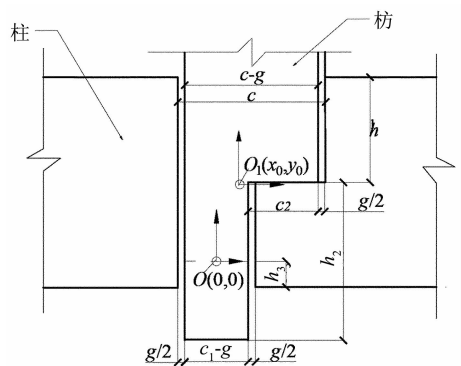


图 4 带空隙透榫节点榫心位置图

Fig. 4 Centroid computing model of the through-tenon joints with gap

$$x_0 = \frac{(c-g)(c-c_1)h_1}{2h_1(c-g)+2h_2(c_1-g)}, \quad (1)$$

$$y_0 = \frac{(c-g)(h_1+h_2)h_1}{2h_1(c-g)+2h_2(c_1-g)}. \quad (2)$$

图 5 所示为正向加载时带空隙透榫节点埋置嵌压作用力学模型.图中 θ 为榫头绕其形心转动时与

垂直方向的夹角,大小近似定义为作动器水平方向伸长距离与加载点至榫头形心距离之比(此处为了简化计算,忽略了枋的弯曲变形), l 为作动器加载点至柱上表皮距离, L 表示作动器加载点至转动中心 O_2 的距离,可由 $L=l+h_1+\frac{h_2}{2}-y_0-Y$ 计算求得.根据假定,榫头转动中心发生变化,由 $O_1(x_0, y_0)$ 移至 $O_2(x_0+X, y_0+Y)$,竖向和水平移动的距离 Y, X 可分别由式(3)(4)给出:

$$Y = \frac{c-g}{2} \sin \theta, \quad (3)$$

$$X = Y \tan \theta. \quad (4)$$

枋在正向荷载作用下转动一定角度,榫头和卯口发生挤压变形,二者之间产生如图5阴影部分所示的埋置嵌压区. $L_1 \sim L_8$ 分别表示榫头和卯口嵌压区各边直线,点A~H分别表示榫卯节点嵌压区各边直线的交点.以 O_1 为原点建立嵌压区各边直线的线性方程.直线 L_1 的斜率为 $1/\tan \theta$,过点 $(-(x_0 + \frac{c_1-g}{2})/\cos \theta, Y)$,其方程可表示如下:

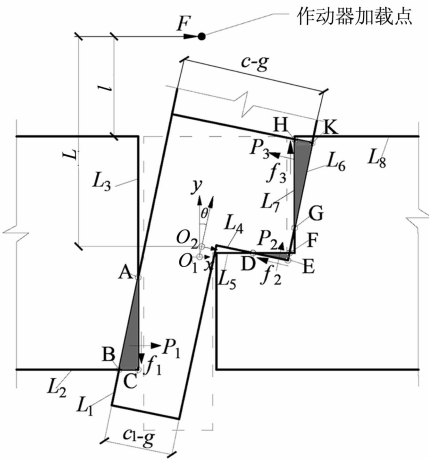


图5 正向加载时带空隙透榫节点埋置嵌压作用力学模型

Fig. 5 Mechanical model of the embedded

through-tenon joint with gap under the positive load

$$L_1: y = \frac{1}{\tan \theta} x + \left(x_0 + \frac{c_1-g}{2}\right) \frac{1}{\sin \theta} - \frac{X}{\tan \theta} + Y. \quad (5)$$

同理,嵌压区其他边也可用线性方程表示如下:

$$L_2: y = -(y_0 + h_3), \quad (6)$$

$$L_3: x = -(x_0 + \frac{c_1}{2}), \quad (7)$$

$$L_4: y = -x \tan \theta + \left(\frac{h_2}{2} - y_0\right) \frac{1}{\cos \theta} + Y, \quad (8)$$

$$L_5: y = \frac{h_2}{2} - y_0, \quad (9)$$

$$L_6: y = \frac{1}{\tan \theta} x - \left(\frac{c_1-g}{2} + c_2 - x_0\right) \frac{1}{\sin \theta} - \frac{X}{\tan \theta} + Y, \quad (10)$$

$$L_7: x = \frac{c_1}{2} + c_2 - x_0, \quad (11)$$

$$L_8: y = -\tan \theta x + \left(h_1 + \frac{h_2}{2} - y_0\right) \frac{1}{\cos \theta} + X \tan \theta + Y. \quad (12)$$

通过以上直线方程可以求得图5中所示榫卯节点嵌压区各边交点A~H的坐标.由图5中嵌压阴影区ABC可以看出,挤压应变沿垂直于AC方向呈三角形分布,C点应变最大,A点应变为0.根据已经求得的各嵌压点坐标,以小榫头埋置嵌压的长度(即B、C两点之间的距离)与小榫头截面高度之比表示榫头埋置嵌压区的应变:

$$\epsilon_{\max} = \frac{\sqrt{(C_x - B_x)^2 + (C_y - B_y)^2}}{c_1 - g}. \quad (13)$$

根据基本假定,横纹受压区应力-应变关系满足胡克定律,则榫头埋置嵌压区木材的最大应力可以表示为:

$$\sigma_{\max} = \begin{cases} E_{\perp} \epsilon_{\max}, \epsilon_{\max} \leq \epsilon_y; \\ \sigma_y + E_{\perp, \tan \theta} (\epsilon_{\max} - \epsilon_y), \epsilon_y \leq \epsilon_{\max} \leq \epsilon_u. \end{cases} \quad (14)$$

根据文献[8]的木材材性测试结果,本文塑性区的木材刚度近似取为木材横纹受压弹性模量的1/4.设嵌压区AC段挤压接触长度为 $y = \sqrt{(A_x - C_x)^2 + (A_y - C_y)^2}$,当嵌压区木材首次达到屈服强度时, $\epsilon_{\max} = \epsilon_y$,此时AC段的长度为嵌压区弹性极限挤压接触长度,记为 y_s ,可求得榫头塑性变形前后榫头嵌压区域的埋置嵌压作用力 P_1 :

$$P_1 = \begin{cases} \frac{1}{2} b y \sigma_{\max}, \epsilon_{\max} \leq \epsilon_y; \\ \frac{1}{2} b \sigma_y y_s + \frac{1}{2} b (\sigma_{\max} + \sigma_y) (y - y_s), \epsilon_y \leq \epsilon_{\max} \leq \epsilon_u. \end{cases} \quad (15)$$

设各埋置嵌压区的压力 P_1, P_2, P_3 距离榫头转动后形心 O_2 的距离分别为 d_1, d_2, d_3 ,摩擦力 f_1, f_2, f_3 距离 O_2 的距离分别为 d_4, d_5, d_6 ,根据几何关系可得:

$$d_1 = y_0 + h_3 + Y - \frac{1}{3} \sqrt{(A_x - C_x)^2 + (A_y - C_y)^2}, \quad (16)$$

$$d_2 = \frac{c_1-g}{2} + c_2 - x_0 - \frac{1}{3} \sqrt{(E_x - D_x)^2 + (E_y - D_y)^2}, \quad (17)$$

$$d_3 = h_1 + \frac{h_2}{2} - y_0 - \frac{1}{3} \sqrt{(K_x - G_x)^2 + (K_y - G_y)^2}, \quad (18)$$

$$d_4 = \frac{c_1}{2} + x_0 + X, \quad (19)$$

$$d_5 = \frac{h_2}{2} - y_0, \quad (20)$$

$$d_6 = \frac{c_1}{2} + c_2 - x_0 - X. \quad (21)$$

外力作用于榫卯节点,榫头和卯孔挤压,节点处产生压力和摩擦力.根据节点处水平和竖向力各自平衡,外力产生的弯矩由嵌压作用力对转动中心的力矩平衡可得:

$$F + P_1 + P_2 \sin \theta - f_2 \cos \theta - P_3 \cos \theta = 0, \quad (22)$$

$$P_2 \cos \theta + f_2 \sin \theta + P_3 \sin \theta + f_3 - f_1 = 0, \quad (23)$$

$$FL - P_1 d_1 - P_2 d_2 - P_3 d_3 - f_1 d_4 - f_2 d_5 - f_3 d_6 = 0. \quad (24)$$

嵌压区的摩擦力可表示为:

$$f_1 = \mu P_1, f_2 = \mu P_2, f_3 = \mu P_3 \cos \theta. \quad (25)$$

式(25)中 μ 为木材间摩擦系数,本文在计算时取 μ 为0.3.将式(25)代入平衡方程,联立求解得到由 P_1 表示的正向加载条件下带空隙透榫节点弯矩 M_{O_2} 与转角 θ 的关系表达式:

$$M_{O_2} = FL = \frac{p(\theta)q(\theta) + r(\theta)}{p(\theta)s(\theta) + t(\theta)} P_1 L. \quad (26)$$

式中:

$$p(\theta) = (\tan \theta - \mu)(\mu \cos \theta + \sin \theta) + \mu \sin \theta + \cos \theta;$$

$$q(\theta) = d_1 + \frac{d_3}{\cos \theta} + \mu(d_4 + d_6);$$

$$r(\theta) = (d_3 + \mu d_6 \cos \theta)(\mu \tan \theta - \tan^2 \theta) - (d_2 + \mu d_5) \tan \theta;$$

$$s(\theta) = L - \frac{d_3}{\cos \theta} - \mu d_6;$$

$$t(\theta) = (\tan^2 \theta - \mu^2)(d_3 + \mu d_6 \cos \theta) + (d_2 + \mu d_5)(\mu + \tan \theta).$$

2.3 反向加载时带空隙透榫节点弯矩-转角关系理论分析

图6所示为反向加载时带空隙透榫节点埋置嵌压作用力学模型.枋在反向荷载作用下转动一定角度,榫头和卯口发生挤压变形,二者之间产生如图6阴影部分所示的埋置嵌压区, $L_1 \sim L_6$ 分别表示榫头和卯口嵌压区各边直线,点A~F分别表示榫卯节

点嵌压区各边直线的交点.以未发生转动时的榫头形心 O_1 为坐标原点,建立嵌压区各直线的线性方程.直线 L_1 的斜率为 $-\frac{1}{\tan \theta}$,过点

$(-\frac{c_1 - g}{2} + x_0) \frac{1}{\cos \theta} - X, Y$,方程表示如下:

$$L_1: y = -\frac{1}{\tan \theta} x - \left(\frac{c_1 - g}{2} + x_0\right) \frac{1}{\sin \theta} - \frac{X}{\tan \theta} + Y. \quad (27)$$

同理,嵌压区其他边也可用线性方程表示如下:

$$L_2: x = -\left(\frac{c_1}{2} + x_0\right), \quad (28)$$

$$L_3: y = x \tan \theta + (h_1 + \frac{h_2}{2} - y_0) \frac{1}{\cos \theta} + Y, \quad (29)$$

$$L_4: y = -(y_0 + h_3), \quad (30)$$

$$L_5: x = \frac{c_1}{2} - x_0, \quad (31)$$

$$L_6: y = -\frac{1}{\tan \theta} x + \left(\frac{c_1 - g}{2} - x_0\right) \frac{1}{\sin \theta} - \frac{X}{\tan \theta}. \quad (32)$$

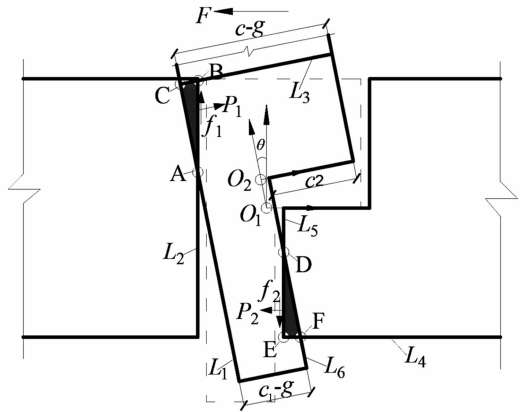


图6 反向加载时带空隙透榫节点埋置嵌压作用力学模型

Fig. 6 Mechanical model of the embedded through-tenon joint under the negative load

通过以上直线方程可求得图6中所示榫卯节点嵌压区各边交点A~F的坐标.根据已经求得各嵌压点坐标,以大榫头埋置嵌压的长度(即B、C两点之间的距离)与大榫头截面高度之比表示榫头埋置嵌压区的应变:

$$\epsilon_{\max} = \frac{\sqrt{(C_x - B_x)^2 + (C_y - B_y)^2}}{c - g}. \quad (33)$$

根据式(14)(15)可求得榫头左上角区域的埋置嵌压作用力 P_1 .设嵌压区的压力 P_1 、 P_2 距离榫头转

动后形心 O_2 的距离分别为 d_1, d_2 , 摩擦力 f_1, f_2 距离 O_2 的距离分别为 d_3, d_4 , 根据几何关系可得:

$$d_1 = h_1 + \frac{h_2}{2} - y_0 - \frac{1}{3} \sqrt{(C_x - A_x)^2 + (C_y - A_y)^2}, \quad (34)$$

$$d_2 = h_3 + y_0 + Y - \frac{1}{3} \sqrt{(D_x - E_x)^2 + (D_y - E_y)^2}, \quad (35)$$

$$d_3 = \frac{c_1}{2} + x_0 - X, \quad (36)$$

$$d_4 = \frac{c_1}{2} - x_0 + X. \quad (37)$$

由带空隙透榫节点嵌压区水平力、竖向力和榫头转动中心力矩平衡可得:

$$P_1 \cos \theta - P_2 - F = 0, \quad (38)$$

$$P_1 \sin \theta + f_1 - f_2 = 0, \quad (39)$$

$$P_1 d_1 + P_2 d_2 + f_1 d_3 + f_2 d_4 - FL = 0. \quad (40)$$

嵌压区摩擦力可表示为:

$$f_1 = \mu P_1 \cos \theta, f_2 = \mu P_2. \quad (41)$$

将式(41)代入平衡方程, 联立求解得到由 P_1 表示的反向加载条件下带空隙透榫节点弯矩 M_{O_2} 与转角 θ 的关系表达式:

$$M_{O_2} = PL = \frac{p(\theta)}{q(\theta)} P_1 L. \quad (42)$$

式中: $p(\theta) = (1 + \mu \cos \theta) d_1 + (1 + \mu) d_2 \cos \theta$;

$$q(\theta) = L + (1 + \mu) d_2.$$

3 带空隙透榫节点弯矩-转角关系理论结果验证

为验证带空隙透榫节点弯矩-转角理论计算公式的正确性, 本文参照文献[6]所做试验, 将带空隙透榫节点弯矩-转角关系理论计算结果与试验结果进行对比分析. 文献[6]采用 1:3.2 的缩尺比例, 制作了 1 个完好节点, 5 个带空隙的残损透榫节点, 进行了低周反复加载试验. 试验选用木材为樟子松, 其物理力学性能指标见表 1, 透榫节点模型的几何尺寸参数见表 2.

表 1 木材物理力学性能指标

Tab. 1 Mechanical performance index of wood

木材种类	顺纹抗拉强度/MPa	顺纹抗压强度/MPa	横纹抗压强度/MPa	抗弯强度/MPa	顺纹弹性模量/MPa	径向弹性模量/MPa	弦向弹性模量/MPa	含水率/%
樟子松	54.3	23.2	3.2	35.9	3 550	210	154	13.3

表 2 透榫节点模型几何尺寸参数

Tab. 2 Geometric parameters of through-tenon joint

构件名称	大榫头截面高 c /mm	小榫头截面高 c_1 /mm	变截面处榫高 c_2 /mm	榫头宽度 b /mm	大榫头榫长 h_1 /mm	小榫头榫长 h_2 /mm	小榫头形心至柱下表皮距离 h_3 /mm	加载点至柱上表皮距离 l /mm
透榫节点	160	80	80	60	120	180	30	500

试验加载装置如图 7 所示, 将柱横置于底座之上, 由水平千斤顶固定并施加水平荷载, 梁竖向放置, 由 MTS 水平作动器施加水平反复荷载, 作动器前端通过球铰连接件与枋相连. 试验规定作动器向右推为正向加载, 向左拉为反向加载. 采用以位移为控制的加载方式, 先以控制位移的 10%、20%、30%、40%、50% 依次进行 1 次循环, 再按照控制位移的 60%、80%、100%、120%、140%……依次进行 3 次循环加载, 直至节点发生破坏. 观察试验现象发现, 枋和柱基本无损坏, 卯口也无明显变形; 由于反复加载挤压, 榫头发生大量塑性变形, 变形显著, 榫颈处挤压变细; 正向加载时, 榫头发生弯曲破坏; 反向加载时, 榫头变截面处发生顺纹撕裂破坏. 试验最

终得到了完好及带空隙透榫节点的弯矩-转角关系滞回曲线及骨架曲线.



图 7 透榫节点试验测试装置

Fig. 7 Experimental setup of mechanical test with through-tenon joint

根据前文推导的公式,计算得到了空隙为 4 mm 和 8 mm 的透榫节点弯矩-转角曲线,与试验结果对比见图 8,正反向初始刚度及峰值承载力的理论值与试验值的误差见表 3.从图中可看出,理论计算结果大致分为 3 个阶段:第一阶段为初始滑移阶段,由于节点松动,榫头和卯口未能完全接触,外力作用下榫头发生自由转动,此阶段弯矩为零.第二阶段为弹性变形阶段,当榫头转动角度大于自由转动角度时,榫头和卯口接触并发生挤压,节点弯矩快速增加.随着榫头与卯口不断挤紧,木材局部达到屈服强度.第三阶段为塑性变形阶段,由于木材的自密实性,节点屈服后强度依然继续增加,节点弯矩不断增大,但节点转动刚度逐渐减小.

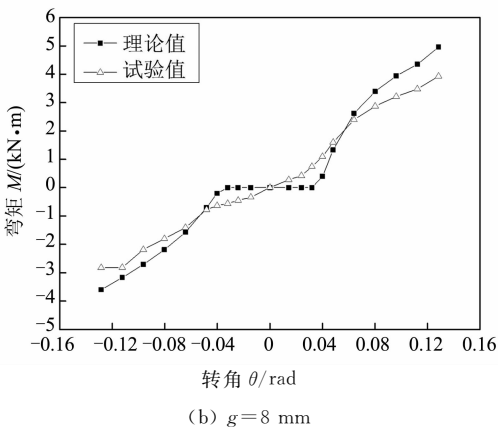
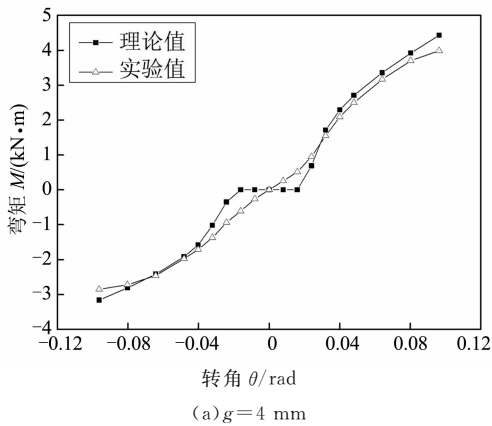


图 8 带空隙透榫节点弯矩-转角
曲线理论与试验结果对比

Fig. 8 Comparison between theoretical and experimental results on moment-rotation of the through-tenon joint

试验结果也大致分为 3 个阶段,表明理论计算结果与试验结果一致.在初始滑移阶段理论计算弯矩为零,而试验测试弯矩不为零(较小),分析原因可能是:在实际试验环境下,沿榫头截面宽度方向侧面和卯口侧面存在一定的摩擦力,这些摩擦力会提供

少量弯矩.此外,试验通过削减榫头高度来模拟实际中由于木材干缩造成的节点松动,从而导致枋的截面高度略大于榫头截面高度,枋开始转动时会与柱上表面接触并发生局部挤压,这部分挤压力也会在初始滑移阶段提供少量弯矩.然而为了简化计算,以上两部分在理论中予以忽略.在塑性变形阶段,理论计算弯矩值略大于试验值,分析原因可能是:采用的本构关系与木材实际本构存在差异,且理论计算公式仅根据透榫节点在单一方向加载时推导得到,而实际试验中的低周反复加载会使得节点损伤不断累积.

表 3 理论与试验值误差

Tab. 3 Errors between theoretical and experimental values

空隙/mm	误差/%			
	正向峰值承载力	反向峰值承载力	正向初始刚度	反向初始刚度
4	11	10.7	31	24.2
8	26	27.6	37.3	46.2

注:误差=(理论值-试验值)/理论值×100%.

从表 3 可看出,理论计算得到的节点峰值承载力和初始转动刚度均与试验值有较大误差,且空隙越大,误差越大.一是因为文中未考虑榫头的弯曲变形,仅考虑榫头的刚体转动,导致嵌压变形增大;二是因为本文所参考的试验结果均是由单个试件加载获得,且木材的离散性较大,将会直接导致理论与试验产生很大的偏差.希望能在后期的研究中,通过修正理论与增加试验加载试件数量来验证、完善理论.

4 带空隙透榫节点弯矩和转动刚度影响参数分析

带空隙透榫节点转动弯矩和刚度的影响因素有很多,本文仅选取木材间摩擦因数 μ 、空隙 g 两个主要参数进行分析.

4.1 空隙对节点初始转动刚度的影响分析

通过改变空隙 g 的大小分析其对透榫节点初始转动刚度的影响.考虑到榫卯节点间空隙主要由榫头木材在横纹径向的干缩变形造成,且木材的径向干缩量一般为 3%~6%^[13].因此,本文结合所参照试验的榫头截面高度,取空隙 g (大小分别为 2 mm、4 mm、6 mm 和 8 mm)作为参数进行分析,得到正向加载和反向加载条件下空隙 g 对节点初始转动刚度的变化曲线,如图 9 所示.

从图 9 中可看出,随着空隙 g 的增大,正反向加

载条件下节点的初始转动刚度均在减小,且二者基本呈线性变化.这是因为随着空隙增大,节点嵌压区的嵌压面积变小,导致节点的转动弯矩减小,进而使得节点的初始转动刚度随着空隙 g 的增大而减小.

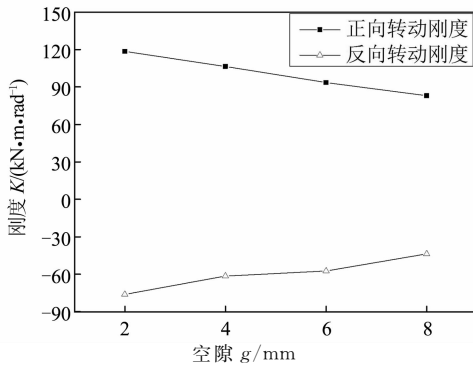


图9 不同空隙下的透榫节点
初始转动刚度变化曲线

Fig. 9 The initial rotation stiffness curves of the through-tenon joint at different widths of the gap

4.2 木材间摩擦因数对节点弯矩-转角关系的影响分析

改变木材间摩擦因数来分析其对透榫节点弯矩转角关系的影响.根据文献[13],木材之间的滑动摩擦因数数值在 0.10~0.65 区间内,本文取木材间摩擦因数 μ 分别为 0.2、0.3、0.4、0.5.图 10 所示为不同摩擦因数对带空隙透榫节点弯矩-转角关系的影响曲线.

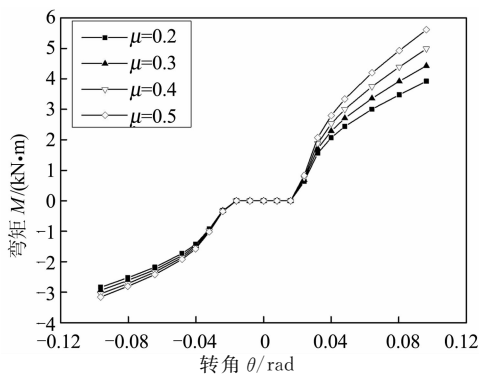


图10 不同木材摩擦因数时带空隙透榫
节点弯矩-转角曲线

Fig. 10 Moment-rotation curves of the through-tenon joint at different friction coefficients of wood

从整体曲线看,摩擦因数的改变对节点的弯矩影响较大.正反向加载条件下,节点屈服前后,随着摩擦因数 μ 的增大,节点的弯矩和转动刚度均增大.从局部曲线看,随着摩擦因数的增大,正向加载条件

下的节点弯矩和转动刚度增加幅度比反向大,节点屈服后的转动弯矩和刚度增加幅度比节点屈服前大.摩擦因数对节点屈服前后弯矩和刚度增大幅度影响不一致的原因是:节点屈服后榫头与卯口之间的挤紧程度大于节点屈服前,且榫头与卯口之间的接触面积不断增大,摩擦力增加幅度较大.摩擦因数对正反向加载情况下节点弯矩和转动刚度增大幅度的影响不一致,是因为随着摩擦因数增大,式(26)中与转角和摩擦因数相关的参数增加幅度大于式(41)中的参数.从力学模型来看,正向加载时榫头与卯口的嵌压区域多于反向,从而使得正向加载时嵌压区榫头与卯口的接触面积均比反向加载时大,随着摩擦因数增大,节点处摩擦力增加幅度较大,所以节点正向转动刚度和弯矩增加幅度大于反向.

5 结论

基于带空隙透榫节点的力学机理分析,推导了带空隙透榫节点弯矩-转角理论计算公式,将理论与试验结果相对比,并分析不同参数对带空隙透榫节点弯矩-转角关系的影响,得到了以下结论:

1)理论计算结果与试验结果整体趋势吻合,为了克服木材的离散性所导致的误差,需要更多的试验来验证理论计算结果.所推导的带空隙透榫节点弯矩-转角理论计算公式可为木结构的受力分析提供一定的依据.

2)以榫卯节点间的空隙 g 为主要参数,研究得到正反向加载情况下,随着空隙 g 的增大,透榫节点的初始转动刚度均随之减小,且基本呈线性变化.

3)在正反向加载情况下,透榫节点屈服前后,随着摩擦因数 μ 的增加,节点的弯矩和转动刚度均增大.但节点屈服后的弯矩和转动刚度均大于节点屈服前,正向加载条件下的节点弯矩和转动刚度大于反向加载.

4)榫卯节点间空隙是影响榫卯节点转动弯矩和刚度的主要因素,木材间摩擦因数对节点弯矩和转动刚度的影响与其相比略小.

参考文献

[1] 罗哲文.中国古代建筑[M].上海:上海古籍出版社,2001:175-176.

LUO Z W. Chinese ancient architectures [M]. Shanghai:

- Shanghai Ancient Books Publishing House, 2001: 175—176. (In Chinese)
- [2] 谢启芳, 郑培君, 向伟, 等. 残损古建筑木结构单向直榫榫卯节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(11): 143—150.
XIE Q F, ZHENG P J, XIANG W, *et al.* Experimental study on seismic behavior of damaged straight mortise-tenon joints of ancient timber buildings [J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(11): 143—150. (In Chinese)
- [3] 潘毅, 李玲娇, 王慧琴, 等. 木结构古建筑震后破坏状态评估方法研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, 43(1): 132—142.
PAN Y, LI L J, WANG H Q, *et al.* Research on evaluation methods for post-earthquake damage state of ancient wooden buildings [J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2016, 43(1): 132—142. (In Chinese)
- [4] 隋奕, 赵鸿铁, 薛建阳, 等. 古建筑木结构直榫和燕尾榫节点试验研究[J]. 世界地震工程, 2010, 26(2): 88—92.
SUI Y, ZHAO H T, XUE J Y, *et al.* Experimental study on characteristics of mortise-tenon joints in historic timber buildings [J]. World Earthquake Engineering, 2010, 26(2): 88—92. (In Chinese)
- [5] 周乾, 闫维明, 纪金豹. 抬梁式木构古建筑榫卯节点受弯破坏数值分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2015, 37(2): 22—28.
ZHOU Q, YAN W M, JI J B. Damage types of tenon-mortise joints of Chinese ancient post and lintel structure under bending loads by simulation [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2015, 37(2): 22—28. (In Chinese)
- [6] 陈春超, 邱洪兴, 包轶楠, 等. 不对称榫卯节点正反向受弯性能试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2014, 44(6): 1224—1229.
CHEN C C, QIU H X, BAO Y N, *et al.* Experimental study on positive and reverse flexural behavior of asymmetric mortise-tenon joints [J]. Journal of Southeast University (Natural Science), 2014, 44(6): 1224—1229. (In Chinese)
- [7] 陈春超, 邱洪兴, 包轶楠. 瓜柱柱脚直榫节点受弯力学模型研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2015, 42(3): 50—56.
CHEN C C, QIU H X, BAO Y N. Study on the flexural mechanical model of straight mortise-tenon joints in the base of melon-column [J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2015, 42(3): 50—56. (In Chinese)
- [8] 夏海伦. 不同松动程度下古建筑透榫节点抗震性能试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学土木工程学院, 2015: 15—27.
XIA H L. Experimental study on seismic behavior of through-tenon joints under different degree of looseness in ancient wooden buildings [D]. Xi'an: College of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, 2015: 15—27. (In Chinese)
- [9] 潘毅, 王超, 唐丽娜, 等. 古建筑木结构直榫节点力学模型的研究[J]. 工程力学, 2015, 32(2): 82—89.
PAN Y, WANG C, TANG L N, *et al.* Study on mechanical model of straight-tenon joints in ancient timber structures [J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(2): 82—89. (In Chinese)
- [10] 谢启芳, 杜彬, 张凤亮, 等. 古建筑木结构燕尾榫节点弯矩-转角关系理论分析[J]. 工程力学, 2014, 31(12): 140—146.
XIE Q F, DU B, ZHANG F L, *et al.* Theoretical analysis on moment-rotation relationship of dovetail joints for Chinese ancient timber structure buildings [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(12): 140—146. (In Chinese)
- [11] 闫辉. 与木结构延性节点抗震设计有关的木材嵌压试验及理论研究[D]. 昆明: 昆明理工大学建筑工程学院, 2008: 28—30.
YAN H. Wood pressure embedded tests and theoretical research on the earthquake-resistant design of wooden structural ductile node [D]. Kunming: Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Kunming University of Science & Technology, 2008: 28—30. (In Chinese)
- [12] CHANG W S, HSU M F, KOMATSU K. Rotational performance of traditional Nuki joints with gap II; the behavior of butted Nuki joint and its comparison with continuous Nuki joint [J]. Journal of Wood Science, 2007, 52(5): 401—407.
- [13] 尹思慈. 木材学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1996: 145—146.
YIN S C. Wood science [M]. Beijing: China Forestry Press, 1996: 145—146. (In Chinese)